第 39 卷 第 2 期
2021 年 6 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 39, No. 2
June., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.02.07

WAAS 电离层格网播发特性及其性能评估

常志巧[1]，陈金平[1]，刘 利[1]，胡小工[2]，郭 睿[2]，
辛 洁[1]，曹月玲[2]，马岳鑫[2]

(1. 32021 部队，北京 100094； 2. 中国科学院 上海天文台，上海 200030)

摘要： 电离层格网信息决定了 RTCA 协议下的 SBAS 增强系统的服务等级。通过对 WAAS 3 颗 GEO 卫星播发的电离层格网信息进行长期分析，获得了 RTCA 协议下格网电离层在电文编排、更新周期、格网分布等方面的详细播发特性。通过解析实际 WAAS 电离层格网电文，设置不同的可用性条件，详细分析了每个格网点的可用性，得到当以 $GIVEI = 15$ 为门限值时，WAAS 播发 263 个可用性为 100% 的电离层格网信息，覆盖包括整个北美大陆及海岸线 20° 以外的大部分地区。通过对比 WAAS 采用的 Kriging 和部分其他增强系统采用的 IDWK 插值方法的格网可用性，得出结论：IDWK 方法仅对参考站布设范围内的格网点具有较高的可用性，Kriging 插值方法以增加 GIVE 为代价，大幅拓展了可用格网点覆盖范围，但也造成脱离大陆的夏威夷群岛上空的格网点完全不可用。利用 CODE 发布的 GIM 模型对 WAAS 可用格网点的格网改正精度进行分析，得到，当 $GIVEI < 14$ 时，不同 GIVEI 格网电离层垂直延迟的改正精度差异较小，GIM 评估的格网电离层垂直延迟的改正精度与纬度相关性较大。在中低纬地区虽然穿刺点分布密集，但其格网改正精度低于高纬地区。

关 键 词： WAAS；电离层格网；播发特性；可用性；精度

中图分类号： P228 **文献标识码：** A

1 引 言

为提高 GPS 导航性能，降低使用风险，美国联邦航空局 (federal aviation administration, FAA) 于 1992 年启动了广域增强系统 (wide area augmentation system, WAAS) 建设，2003 年 7 月被 FAA 正式应用于生命安全领域[1]。WAAS 由 38 个参考站，3 个主站，6 个上

收稿日期： 2020-07-19； **修回日期：** 2020-08-19

资助项目： 国家自然科学基金 (42004028, 41874043, 11203059, 41674041)；国家重点研发计划项目“协同精密定位技术”(2016YFB0501900)

通讯作者： 常志巧，zhiqiaochang@163.com

行注入站及 3 个 GEO 卫星有效载荷组成[2]，已广泛应用于美国大陆和阿拉斯加大部分地区，为航空用户提供从航路阶段到有垂直引导的 LPV-200 增强服务。其精度、完好性、连续性和可用性较基本导航得到大幅提升。欧洲、日本、俄罗斯、印度相继建立相似的广域增强系统。这些广域增强系统采用 GEO L1C/A 信号播发卫星星历、钟差、电离层改正数和修正后误差范围，为 GPS L1C/A 单频用户提供星基增强服务，信息编排遵循航空无线电技术委员会 (radio technical commission for aeronautics, RTCA) 发布的 RTCA DO-229E[3] 标准。

电离层延迟信息是单频非差分定位最主要的误差源之一。在广域增强服务中，格网电离层决定了增强系统服务等级，RTCA DO-229E 标准中规定若未收到电离层格网信息，则增强系统只能提供非紧密进近 (non-precision approach, NPA) 服务。我国正在建设的北斗星基增强系统 (BeiDou satellite-based augmentation services, BDSBAS)，将实现与国际其他增强系统兼容互操作，提供包括基于 L1/CA 信号播发的单频和基于 L5 播发的双频多星座 (dual frequency multi-constellation, DFMC) 增强服务[4]。研究成熟增强系统 WAAS 的电离层格网信息编排方式、播发特性，格网可用性以及格网电离层垂直延迟改正精度等有利于用户正确使用格网电离层改正信息，对我国正在建设的单频星基增强系统有参考价值。

2 基于 RTCA 协议的电离层格网信息编排方法

增强电文的每个电文数据帧由 250 bit 构成，播发时间为 1 s。其中，最高 8 bit 为同步头序列，接下来 6 bit 表示信息类型，最低 24 bit 为循环冗余校验位，其余 212 bit 为数据域。因上注链路带宽有限，无法大范围播发任意地点的电离层格网信息，RTCA 接口协议将全球划分为 11 个边带 (编号 0－10)，每个边带至多有 201 个格网点，采用播发定义电离层格网点位置信息的格网点掩码来映射需要播发的格网电离层延迟信息，只播发特定边带掩码序列中对应比特位数值为 1 的电离层格网信息，这种方式可以提供最有效的电离层模型。格网点掩码采用信息类型 18 (Tyep 18) 表示 (定义见表 1)，信息类型 18 通过边带编号来指明其掩码所针对的边带，边带总数说明当前 GEO 卫星播发掩码的边带总数，以便用户确认是否接收所有的电离层相关数据。每帧信息类型 18 中，可以播发一个边带的格网掩码。

表 1　信息类型 18 参数描述

名称	长度/bit	比例因子	有效范围
边带总数	4	1	0∼11
边带号	4	1	0∼10
IODI	2	1	0∼3
格网掩码	201	无	无
预留	1	无	无

WAAS 信息类型 26 (Tyep 26) 中包含格网电离层垂直延迟 (grid ionospheric vertical delay, GIVD) 和格网电离层垂直误差 (grid ionospheric vertical error, GIVE)，GIVE 是电离

层残余误差以 99.9% 置信概率的包络[5]，GIVEI 是格网电离层垂直误差标识，与 GIVE 之间的映射关系见 RTCA-DO229E。信息类型 26 具体定义见表 2。信息类型 18 和信息类型 26 每帧电文包含电离层掩码数据龄期 (issue of data ionospheric, IODI)，用以保证接收机正确解析电离层改正数。只有当信息类型 18 中的 IODI 与信息类型 26 中的 IODI 匹配成功，信息类型 26 才是可以使用的电离层信息。每帧信息类型 26 可以播发信息类型 18 中格网掩码比特位为 1 的 15 个有效格网点电离层信息，一个边带的格网电离层延迟信息需要通过多帧播发。表 2 中的“……”代表同一区段中其余格网点按照格网点 1 及格网点 2 的方式循环。

表 2　信息类型 26 参数描述

名称	长度/bit	比例因子	有效范围及单位
边带号	4	1	0~10
区段编号	4	1	0~13
格网点电离层垂直延迟-1	9	0.125	0~63.875 m
格网点电离层垂直误差标识-1 (GIVEI-1)	4	1	0~15
格网点电离层垂直延迟-27	9	0.125	0~63.875 m
格网点电离层垂直误差标识-2 (GIVEI-2)	4	1	0~15
……	……	……	……
……	……	……	……
格网点电离层垂直延迟-15	9	0.125	0~63.875 m
格网点电离层垂直误差标识-15 (GIVEI-15)	4	1	0~15
电离层数据版本号 (IODI)	2	1	0~3
预留	7	无	无

3　WAAS 电离层格网播发特性分析

增强电文可以从 ftp://nstb.tc.faa.gov 下载，每颗 GEO 卫星的所有信息类型按天储存为一个文件。WAAS 共有 PRN 131, PRN 135 和 PRN 138 共 3 颗 GEO 卫星，分别定点于西经 117°, 133° 和 107.3°。笔者下载了从 2019 年 1 月 1 日至 2019 年 1 月 31 日 3 颗 GEO 卫星的 WAAS 电文，根据 RTCA DO-229E 协议，进行了电文解析。

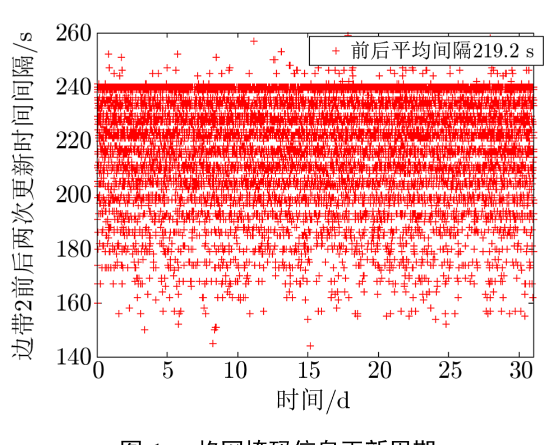
采用 2019 年 1 月 1 日的 WAAS 电文，对 3 颗 GEO 卫星信息类型 18 和信息类型 26 进行对比分析发现，虽然 PRN131, 135, 138 的覆盖区域不同，但每颗 GEO 卫星播发相同的电离层信息，电离层数据版本与其余电离层信息内容完全一致。以 PRN135 为例，分析格网电离层播发总体特性。通过对 2019 年 1 月的电文数据进行分析发现，电离层数据版本号 IODI 长期保持 0 不变，即播发边带总数、边带号以及边带播发具体格网都不变。总体而言，WAAS 播发 5 个边带的电离层掩码信息，边带编号为 0, 1, 2, 3, 9，占用电文 5 帧，即每个更新周期需要 5 s 播发信息类型 18。每个边带及其对应的区段总数见表 3，总计共播发 306 个格网点信息，共占用 23 个区段数，占用电文 23 帧，即一个更新周期需要 23 s 播发信息

类型 26。

表 3 WAAS 格网电离层播发总体特性

边带号	格网个数	区段总数	电文帧数
0	41	3	3
1	61	5	5
2	72	5	5
3	35	3	3
9	97	7	7
总计	306	23	23

RTCA 协议中对每一类信息的最大更新时间有明确规定，对于 Type18 和 Type26 规定的更新周期均为 300 s，超时时间均为 1 200 s。通过对 2019 年 1 月 Type18 和 Type26 电文的更新周期分析，发现 Type18 电离层掩码更新时间间隔平均为 219.2 s，最小为 144 s，最大为 259 s，具体情况见图 1。Type26 电离层延迟更新时间间隔平均为 288.2 s，最小为 288 s，最大为 302 s，具体情况见图 2，时间间隔符合 RTCA 协议要求。



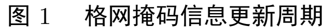


图 1 格网掩码信息更新周期

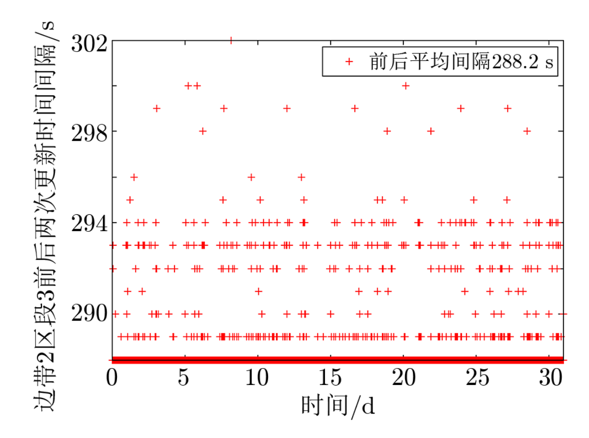


图 2 电离层延迟信息更新周期

4 WAAS 电离层格网信息可用性分析

WAAS 系统把复杂的电离层描述为距地面 350 km 的薄层[3]，作为电离层参考面。在参考面上，按一定间隔分割成一定数量的网格。各参考站实时计算可视范围内导航卫星的电离层延迟，同时计算出在电离层格网面上穿刺点经纬度，根据穿刺点信息估算服务区内格网电离层垂直延迟和 GIVEI。格网电离层的可用性与参考站和穿刺点分布相关。图 3 给出了 38 个 WAAS 参考站分布图，参考站坐标来自文献 [1]。图 4 给出了 2019 年 1 月 1 日— 2019 年 1 月 7 日连续 7 d 电离层穿刺点分布。

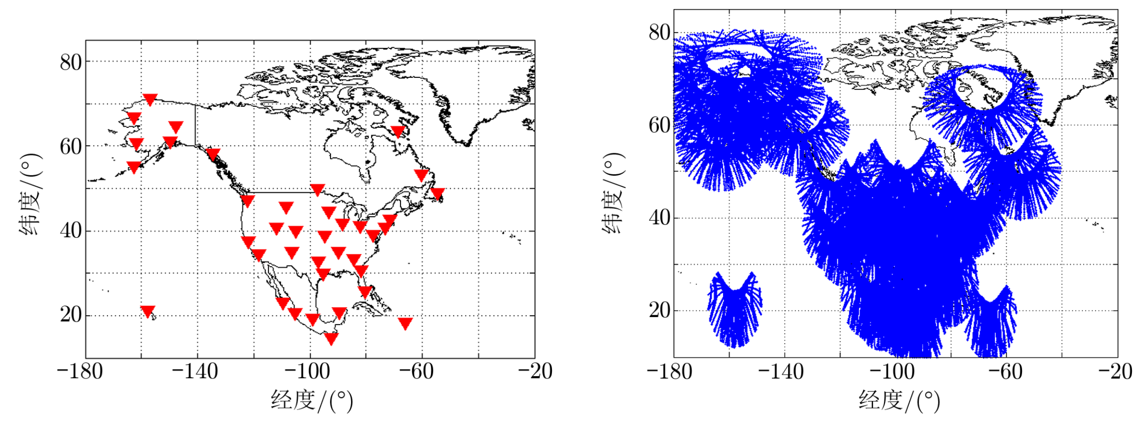


图 3　WAAS 参考站分布图

图 4　连续 7 天 WAAS 穿刺点分布图

RTCA DO-229E 标准中规定精密进近服务模式下，必须使用所有 WAAS 改正，当 $GIVEI$ 为 15 时，该格网点不可用。图 5 表明 WAAS 播发的 306 个格网点分布及每个格网点的可用性。可用性采用式 (1) 计算：

$$AOA = \frac{\sum_{t=t_{\text{start},inc-T}}^{t_{\text{end}}}\{Boot(t) = True\}}{1 + \dfrac{t_{\text{end}} - t_{\text{start}}}{T}}\quad, \tag{1}$$

其中，t_{start} 和 t_{end} 分别为一组测试数据的起始和结束时刻；T 为固定的历元时间间隔，如果在当前历元 t 时 $GIVEI < 15$，则 $Boot(t) = 1$，否则 $Boot(t) = 0$。

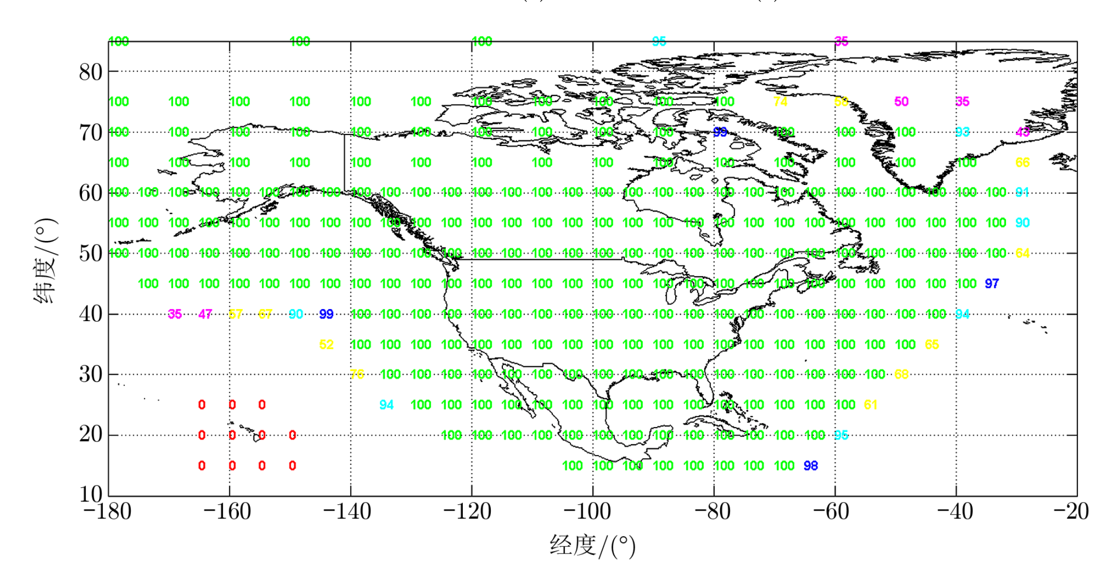


图 5　WAAS 电离层格网点可用性分布 ($GIVEI < 15$ 为可用)

对图 5 进行统计，以 $GIVEI$ 小于 15 为可用条件，WAAS 播发 263 个可用性为 100%

的电离层格网信息，覆盖范围广，在整个北美洲大陆和周边延伸 20° 海域的范围内几乎所有格网点可用性为 100%。但在夏威夷群岛地区，虽然布设了一个参考站，但其周围的格网点可用性为 0。$GIVEI$ 反映了格网点电离层延迟的精度，用于计算用户水平和垂直保护水平。当 $GIVEI$ 较大时，会影响服务的可用性；$GIVEI$ 较小以致不能包络格网电离层延迟误差时，容易引发危险误导信息。不同的 WAAS 格网可用条件会导致不同的可用性统计结果。表 4 列出了五种条件下 WAAS 格网可用性统计。

表 4　WAAS 格网可用性统计/格网个数

格网可用条件 ($GIVEI$)	$AOA \geqslant 99.9\%$	$95\% \leqslant AOA < 99.9\%$	$80\% \leqslant AOA < 95\%$	$50\% \leqslant AOA < 80\%$	$20\% \leqslant AOA < 50\%$	$AOA < 20\%$
< 15	263	6	8	12	6	11
< 14	257	8	7	13	10	11
< 13	209	10	13	11	14	49
< 12	173	16	20	15	14	68
< 11	54	26	17	28	22	159

从表 4 可以看出，随着 $GIVEI$ 可用门限值的降低，高可用性的格网个数减少，低可用性的格网个数增加。当 $GIVEI$ 门限值为 11 时，可用性大于 99.9% 的格网个数只剩 54 个，呈断崖式减小趋势。图 6 给出了当 $GIVEI$ 门限值为 11 时，WAAS 电离层格网可用性分布。

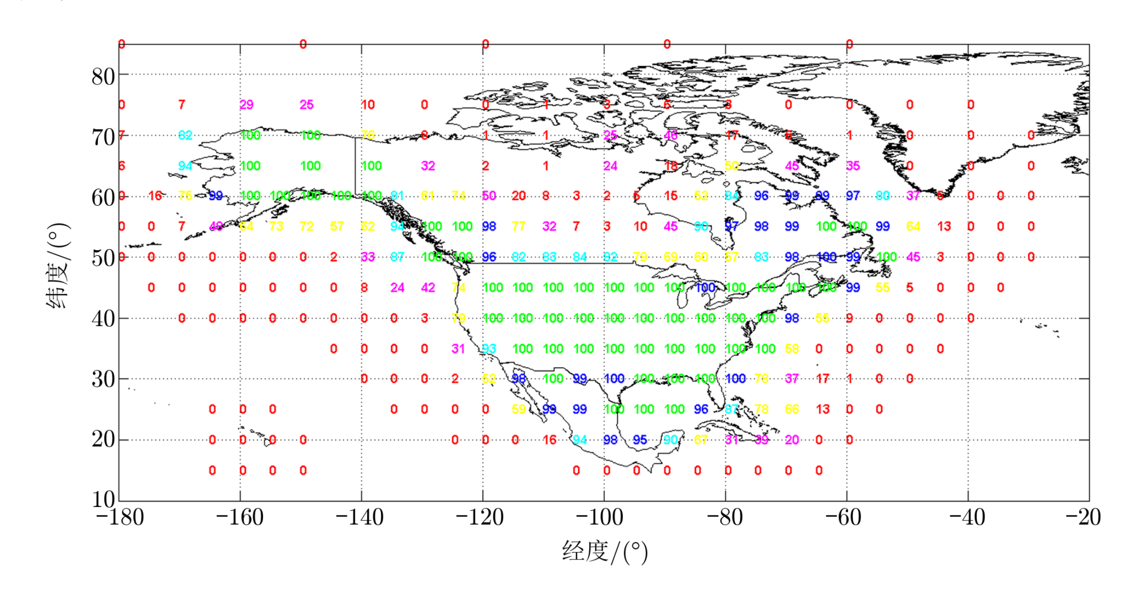


图 6　WAAS 电离层格网点可用性分布 ($GIVEI < 11$ 为可用)

WAAS 系统建设之初采用反距离加权 IDW (inverse distance weighed) 算法解算格网电离层延迟信息[6]，为了使得整个格网模型连续，在 IDW 算法的基础上引入名义延迟模

型，发展了附加 Klobuchar 模型的反距离加权 (inverse distance weighed with Klobuchar, IDWK) 算法[7−9]。印度的星基增强系统 (GPS and GEO augmented navigation system, GAGAN)[10−11]和中国的北斗系统也采用 IDWK 算法解算格网电离层。IDW 或 IDWK 算法优点是快速、简单，对具有较高观测密度的样本，可以获得较好的空间插值精度；缺点是边缘区域和观测稀疏区域的插值精度、格网点可用性均会下降。目前，WAAS 已采用了 Kriging 空间相关内插方案计算格网电离层垂直延迟[12]，采用基于电离层异常状态的卡方检验算法计算 $GIVE$[13]。

图 5、图 6 和表 4 是利用 Kriging 插值方法计算的格网可用性。图 7 给出了采用 IDWK 方法求解的 WAAS 格网可用性 (可用性门限为 $GIVEI=15$)。从图 7 可以看出，可用性高的格网点位于美国本土、阿拉斯加及具有穿刺点分布的区域，几乎与参考站布设范围一致。夏威夷群岛地区由于布设了参考站，部分时段也能求解格网电离层延迟信息。对比 Kriging 和 IDWK 插值方法的格网可用性，发现 Kriging 插值方法大幅拓展了可用格网点覆盖范围，但也造成脱离大陆的夏威夷群岛附近的格网点完全不可用。

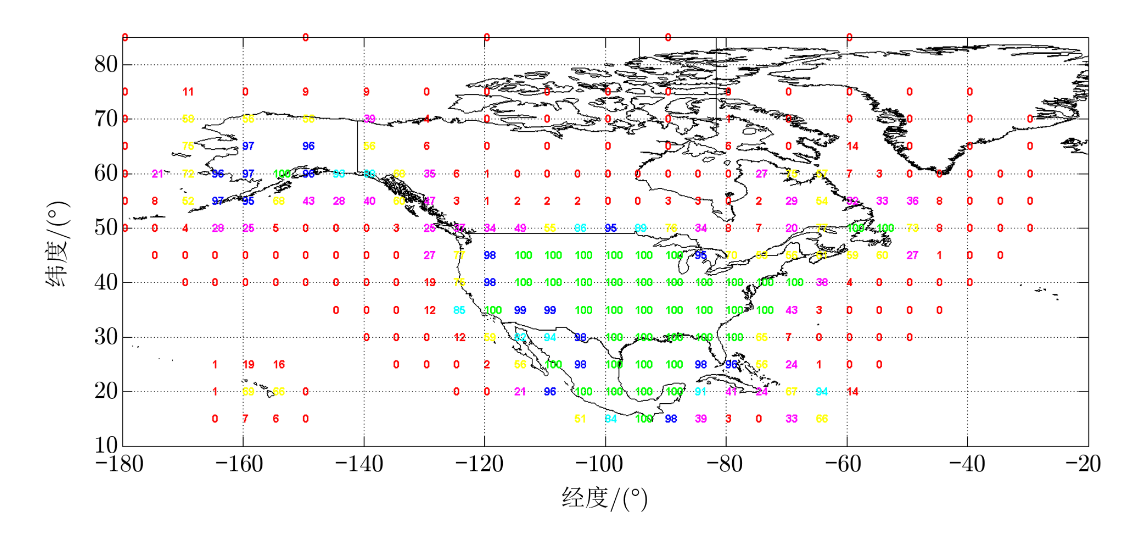


图 7　采用 IDW 方法计算的 WAAS 格网可用性分布图

5　WAAS 格网电离层垂直延迟改正精度分析

本文通过欧洲定轨中心 (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 发布的全球电离层图 (global ionosphere map, GIM)[14,15]来对 GIVD 的改正精度进行评估，评估时段为 2019 年 1 月 1 日全天。表 5 将 WAAS 提供的 306 个格网点按照不同 $GIVEI$ 进行分类统计，统计结果表明，在 $GIVEI<14$ 的情况下，不同 $GIVEI$，格网电离层垂直延迟的改正精度差异较小，GIM 评估的 RMS 在 0.170～0.248 m 范围内。当 $GIVEI=14$ 时，其 GIM 评估的 RMS 明显大于 $GIVEI<14$ 的情况。

表 5　格网电离层垂直延迟改正精度统计

m

$GIVEI$	平均 $GIVD$	最小 $GIVD$	最大 $GIVD$	GIM 评估 RMS
9	0.683	0.000	2.000	0.248
10	0.491	0.000	2.375	0.170
11	0.607	0.000	2.625	0.193
12	0.654	0.000	2.625	0.212
13	0.625	0.000	2.750	0.238
14	0.745	0.000	2.625	0.432

对所有 $GIVEI < 15$ 的格网点的格网改正精度进行统计分析，结果见图 8。从图中可以看出，格网电离层垂直延迟的改正精度与参考站及穿刺点分布相关性较小，与纬度相关性较大。在中低纬地区 (北纬 40° 以南地区)，格网电离层垂直延迟的改正精度低于高纬地区。

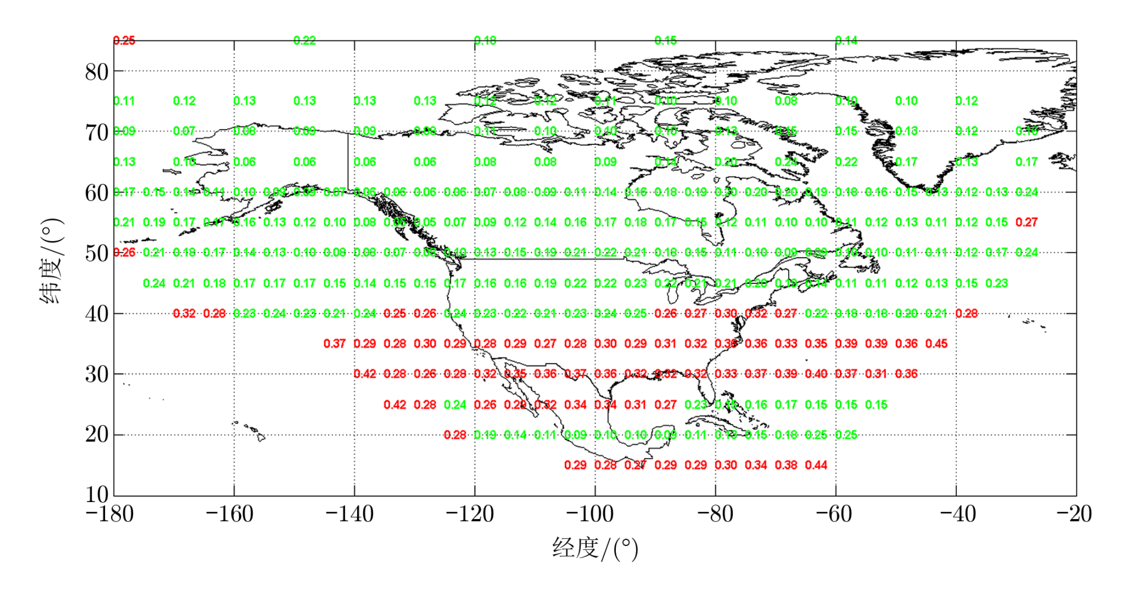


图 8　GIM 模型评估的 WAAS 所有可用格网点垂直延迟误差统计分布

图 9 和图 10 分别为西经 100° 北纬 25° 、西经 150° 北纬 65° 格网点电离层垂直延迟改正误差，时间跨度为 2019 年 1 月 1 日全天。对比两图发现，无论中低纬还是高纬地区，电离层垂直延迟误差都能修正大部分电离层延迟误差；在中低纬地区电离层延迟数值较大，改正后的残差相应也较大；在高纬度地区电离层延迟数值较小，改正后的残差相应也较小。

本章只利用了 CODE 播发的 GIM 产品初步分析了 $GIVD$ 的改正精度，下一步将尝试采用未参与 WAAS 格网电离层解算的 GNSS 监测站的高精度双频观测资料计算电离层延迟信息，进一步计算和分析 WAAS 格网电离层垂直延迟改正精度，并对 GIVE 的包络能力进行分析。

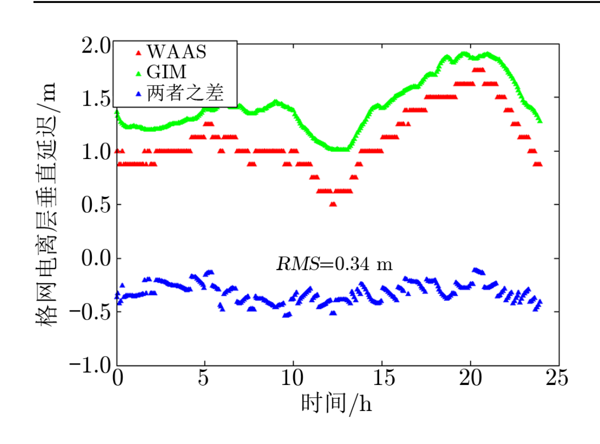


图 9　低纬地区格网电离层垂直延迟改正误差

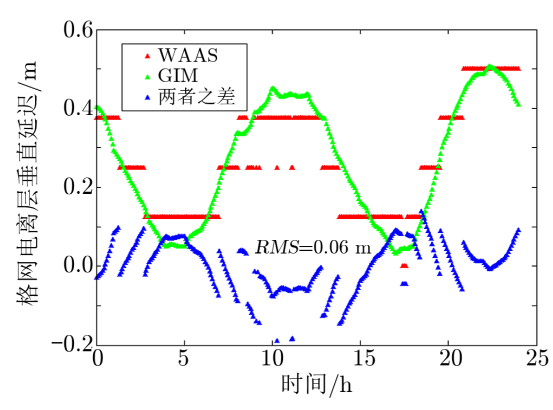


图 10　高纬地区格网电离层垂直延迟改正误差

6　结　论

本文对 WAAS 3 颗 GEO 卫星播发的电离层格网信息进行了统计分析，采用不同的可用性条件对格网电离层的可用性进行评估，利用 CODE 发布的 GIM 模型对 WAAS 格网电离层垂直延迟改正精度进行了计算。得到的主要结论如下所述。

(1) 在播发特性方面，3 颗 GEO 卫星播发相同的电离层信息；电离层数据版本号 IODI 长期不变，表明每个更新周期内每次播发的格网数量及分布都不变。WAAS 总共播发 306 个格网点信息，需要 5 帧电文播发 Type18，需要 23 帧电文播发 Type26；Type18 和 Type26 更新周期满足 RTCA 协议要求。

(2) 在格网可用性方面，当以 $GIVEI = 15$ 为门限值时，WAAS 播发 263 个可用性为 100% 的电离层格网信息，覆盖包括整个北美大陆及海岸线 20° 以外的大部分地区，覆盖范围远超穿刺点的分布范围。穿刺点稀疏地区的 $GIVEI$ 大于穿刺点密集地区的格网点。当以 $GIVEI = 11$ 为门限值时，WAAS 仅能播发 54 个可用性为 100% 的电离层格网信息，仅覆盖美国大陆、阿拉斯加和部分穿刺点密集区域。通过对比 Kiriging 和 IDWK 插值方法的可用性，发现 IDWK 方法仅对参考站布设范围内的格网点具有较高的可用性，Kriging 插值方法大幅拓展了可用格网点覆盖范围，但也造成脱离大陆的夏威夷群岛附近的格网点完全不可用。

(3) 在格网改正精度方面，当 $GIVEI = 14$ 时，格网电离层垂直延迟改正误差大于 $GIVEI < 14$ 的情况。当 $GIVEI < 14$ 时，不同 $GIVEI$，格网电离层垂直延迟的改正精度差异较小，GIM 评估的 RMS 为 $0.170 \sim 0.248$ m，GIM 评估的格网电离层垂直延迟的改正精度与参考站及穿刺点分布相关性较小，与纬度相关性较大。在中低纬地区 (北纬 40° 以南地区)，格网电离层垂直延迟的改正精度低于高纬地区。

参考文献：

[1] FAA William J. Wide Area Augmentation System Performance Analysis Report#68. http://www.nstb.tc.faa.gov/, 2019
[2] http://www.nstb.tc.faa.gov, 2020
[3] SC-159. Minimum Operational Performance Standard for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment [S]. Washington DC: RTCA, 2016: 33
[4] http://m.beidou.gov.cn, 2020
[5] Peter J G, Teunissen O M. Springer Handbook of Global Navigation Satellite. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2017: 1285
[6] Specification for Wide Area Augmentation (WAAS)[S]. US: Federal Aviation Administration, 1994: 58
[7] Chao Yi-chung, Tsai Y, Walter T, et al. Proceedings of ION NTM-95. Anaheim: CA, 1995: 531
[8] M Bakry El-Arini, Patricia O'Donnell, Paul Kellam, et al. Proceedings of ION NTM-95. Anaheim: CA, 1995: 485
[9] 陈金平. 博士论文. 郑州: 信息工程大学, 2001: 94
[10] Prasad N, Sarma A D. Indian Geophys Union, 2004, 8(4): 319
[11] Prasad N, Sarma A D. GPS Solutions, 2007, 11: 281
[12] Blanch J. Proceedings of ION GPS. Portland: UT, 2002: 816
[13] Walter T, Hansen A, Blanch J, et al. Proceedings of ION GPS. Salt Lake City: UT, 2000: 209
[14] Schaer S. How to use CODE's global inosphere maps. http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/, 2017: 1
[15] Schaer S, Gurtner W, Feltens J. Proceedings of the IGS AC Workshop. Darmstadt: University of Berne, 1998: 1

Broadcast Characteristics and Performance Evaluation of WAAS Ionospheric Grid

CHANG Zhi-qiao[1], CHEN Jin-ping[1], LIU Li[1], HU Xiao-gong[2], GUO Rui[1], XIN Jie[1], CAO Yue-ling[2], MA Yue-xin[2]

(1. Troops 32021, Beijing 100094, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: Grid ionosphere information determines the service level of SBAS with RTCA protocol. Based on the long-term analysis of the ionosphere information broadcast by three WAAS GEO satellites, we obtain the detailed broadcast characteristics of grid ionosphere with RTCA protocol in terms of message arrangement, update period, grid distribution, etc. According to different availability conditions, the availability of each grid is analyzed in detail. When $GIVEI = 15$ is the threshold value, WAAS broadcasts 263 grid ionosphere information with 100% availability, covering the whole North American continent and most areas beyond the coastline of 20°. By comparing the grid availability of WAAS with Kriging interpolation and other systems with IDWK interpolation, it is found that IDWK method

has high availability only for grid within the layout range of reference stations. Kriging interpolation method greatly expands the coverage of available grid at the cost of increasing GIVE, but also causes the grid over the Hawaiian Islands which are separated from the mainland to be completely unavailable. Based on the GIM model published by CODE, the correction accuracy of the available grid of WAAS are analyzed. When $GIVEI$ is less than 14, the difference correction accuracy of the ionospheric vertical delay between different $GIVEI$ is relatively small, and the correction accuracy of the grid ionospheric vertical delay evaluated by GIM is relatively large in relation to latitude. Although the ionospheric puncture points are densely distributed in the middle and low latitude area, the correction accuracy is lower than that in the high latitude area.

Key words: WAAS; ionosphere grid; broadcast characteristics; availability; accuracy

《天文学进展》征稿启事

一、本刊刊登反映国内外天文学研究的最新进展和作者见解的述评、研究论文、前沿介绍、专题讲座、研究快报。反映新思路、新手段、新成果的短评优先发表。

二、来稿须包括：题名、作者署名、作者单位及所在地与邮政编码、摘要、关键词、正文、参考文献、英文摘要、英文关键词等。

三、来稿应论点明确、叙述精练、条理清晰、深入浅出，以利非本分支学科的读者阅读。

四、摘要应简明扼要地概括正文中的主要信息。采用第三人称的写法，不用“本文”、“作者”等作主语。稿件如果以中文发表，英文摘要应有近一页的篇幅。

五、关键词请尽可能参照 ApJ., MNRAS 和 A&A 共同采用的关键词表选用，可适当扩充。

六、稿件中引用论点、公式、图、表均需注明参考文献 (按文中出现顺序编码，在右上角用小方括号标出)。正文后则按编码次序依本刊要求的编排格式列出相应的参考文献。

七、审定稿后需提供清稿样的电子文本。本刊采用中西文 Latex 系统软件排版，请从本刊网站 (http://202.127.29.4/twxjz/index.htm) 下载排版模版。

八、图、表务求精、简、规范，以配合文字阐明观点。公式务求精约，杜绝公式推导过程。

九、请勿一稿两投。来稿请通过 E-mail 发送至 twxjz@shao.ac.cn。

《天文学进展》编辑部

2021 年 6 月